



# 多旋翼飞行器

## 设计与控制

全权 著

杜光勋 赵峙尧 戴训华 任锦瑞 邓恒 译

郭祥 插图设计



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>



# 多旋翼飞行器

## 设计与控制

全权 著

杜光勋 赵峙尧 戴训华 任锦瑞 邓恒 译

郭祥 插图设计

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书覆盖了多旋翼飞行器设计的大部分内容，共十五章，包括多旋翼飞行器基础知识、布局、动力系统、建模、感知、控制和决策等部分。旨在将多旋翼飞行器工程实践中应用的设计原则组织起来，并强调基础概念的重要性，具有基础性、实用性、综合性和系统性等特点。本书可以用作高年级本科生以及研究生教材，或者作为该领域研究的入门指南，还可以作为多旋翼飞行器工程师的自学教材。另外，本书也可以作为其他无人飞行系统乃至无人系统的补充阅读材料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

多旋翼飞行器设计与控制/全权著；杜光勋等译. —北京：电子工业出版社，2018.2  
ISBN 978-7-121-31268-7  
I. ①多… II. ①全… ②杜… III. ①飞行器—高等学校—教材 IV. ①V47  
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 070040 号

策划编辑：章海涛

责任编辑：章海涛 特约编辑：徐 堃

印 刷：北京盛通印刷股份有限公司

装 订：北京盛通印刷股份有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：23.25 字数：590 千字

版 次：2018 年 2 月第 1 版

印 次：2018 年 2 月第 1 次印刷

定 价：98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式：192910558 (QQ 群)。



## 中文序

多旋翼飞行器因其易用性、高可靠性以及易维护性，在军用和民用领域应用广泛。纵观多旋翼飞行器在工业界的发展历史，德国的公司主导了早期的发展；之后，特别是从2013年开始，中国获得了多旋翼飞行器发展的主导地位。在国内，一大批航模爱好者、不同领域的软/硬件工程师和飞行控制专业人才纷纷加入，围绕多旋翼飞行器的相关创意、技术、产品、应用、投资和政策等层出不穷，可以说，当今中国是世界上微小型多旋翼飞行器研发最活跃的国家。

多旋翼飞行器在行业应用中的高速发展离不开开源飞控的支持。无论是借助开源飞控，还是全自主开发，都需要研发者对多旋翼飞行器设计、建模、感知、控制和决策等全面掌握，才能够真正将飞行器做好。然而，目前微小型飞行器开发不少始于小微企业，与传统的航空院所不同，小微企业存在人员少、经验少和资源少等问题，因此业内迫切需要一大批能够挑起大梁的总工程师和全栈式工程师。

人才缺乏的一个重要原因是多旋翼飞行器发展太快，而相应的教材和课程没有跟进。在这种形式下，作者于2015年年初开始准备课程，于2016年上半年在北京航空航天大学开课，并于2017年3月推出了网络公开课(MOOC)，并在课题组网站 <http://rfly.buaa.edu.cn/course> 发布中英文课件。与此同时，英文教科书一直在急锣密鼓而持续地撰写和修订。在英文书稿基本定稿的情况下，考虑到让国内更多同行能够及时和更方便地阅读，作者邀请杜光勋博士负责中文翻译工作，并于2016年9月在北京航空航天大学可靠飞行控制研究组内展开。具体的翻译工作安排为：杜光勋博士负责第1章、第10章和第12章，赵峙尧负责第13~15章，戴训华负责第2~4章，任锦瑞负责第5章、第6章和第11章，邓恒负责第7~9章，由杜光勋博士统稿。他们花费了大量的时间和巨大的心血，在翻译的同时给本书提出了很多有益的反馈，在此我表示衷心的感谢。可靠飞行控制研究组的史东杰、蔡阳光、颜江、傅嘉宁、郭正龙、张婧、骆遥、马海彪、张贺鹏、杜百会、董科等同学也参与了中文翻译和校对工作，这里对他们也深表感谢。

由于本书跨度较大，涉及较多新的专业词汇及新的概念，加上作者和组内同学水平有限，书中若有不当之处，恳请读者指正（请发邮件至 [qq\\_buaa@buaa.edu.cn](mailto:qq_buaa@buaa.edu.cn)）。我们会不断改进，精益求精，为中国的航空事业贡献自己的一份力量。

全权

于加拿大多伦多

2017年12月



# 前 言

飞行，一直是人类的梦想。早在公元5世纪，中国人就发明了风筝。15世纪末，列奥纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci）手绘了大量的飞行机器和装置的设计图纸，包括扑翼飞机、固定翼滑翔机、旋翼机、降落伞等。1903年12月17日，莱特兄弟（the Wright brothers）发明并成功制作了世界上第一架飞机，并且实现了有动力且重于空气的飞行器的第一次有人操控飞行。自1903年以来，在随后的一百多年里，出现了各种各样的飞行器。然而，只有极少数人能够有机会驾驶并体验操控飞行的乐趣。飞行器和驾驶员一直是那样神秘，直到小型和微型多旋翼飞行器通过遥控玩具市场走近消费者。这主要归功于这类飞行器的易用性、高可靠性以及易维护性。这些特性极大地提高了用户的飞行体验。目前，很难找到一种飞行器能够像多旋翼飞行器那么简单、易用。正因为如此，它们让越来越多的人真正操控并享受到飞行的乐趣。除了作为遥控玩具以外，多旋翼飞行器也作为无人机在一些商业领域发挥作用，包括监控、搜寻以及救援，等等。现在，多旋翼飞行器确立了其在小型无人机市场的主导地位。不管是定义为遥控玩具，还是无人机，多旋翼飞行器都可以作为一个合适的研究对象供学生们研究。这是因为学生有机会在较短的时间内经历从设计到飞行测试的全过程。另一个原因就是，学生可以通过阅读多旋翼飞行器开源代码，并与业内人士交流、互动，来加深对基本原理的理解。

作为北京航空航天大学教学课程的一个成果，本书可以用作高年级本科生以及研究生教材，或者作为该领域研究的入门指南，还可以作为多旋翼飞行器工程师的自学教材。本书也可以作为其他无人飞行系统的补充阅读材料。为了覆盖多旋翼飞行器硬件和算法的大部分设计内容，本书共15章，包括多旋翼飞行器硬件设计、建模、感知、控制和决策五部分。

本书旨在将多旋翼飞行器工程实践中应用的设计原则组织起来，并强调基础概念的重要性，具有以下四个突出的特点。

## 1. 基础性和实用性

本书包含多旋翼涉及的大部分内容，读者只要具有电子工程学（Electronic Engineering, EE）背景，就能够看懂这本书。多旋翼飞行器的组成从其功能和关键参数说起，多旋翼飞行器的设计从原理说起，建模从最基本的理论力学内容说起，状态估计部分从传感器的测量原理说起。在介绍多旋翼控制之前，本书介绍了可控性和稳定性概念。另外，书中大部分方法具有基础和实用性，并紧密结合目前经常使用的开源自驾仪。

## 2. 综合性和系统性

本书致力于全面介绍多旋翼飞行器系统，而不仅仅关注某一个技术点。通常在实际工作中，仅仅了解某个技术点不能满足用户的需求，也无法解决复杂的实际问题。另一方面，通过相关技术的改进或者方案的改进，可以避免在单个技术点上下太多功夫。比如，通过传感器或机械结构设计的改进，可以避免设计非常复杂的控制器来解决时滞和振动



问题。对于一名大学生来说，掌握了基本的理论知识，如数学、空气动力学、材料学、结构学、电子学、滤波优化和控制理论等，就应当把这些知识融会贯通，努力使自己成为一名全栈式开发者。这也是本书希望达到的目的。

本书的准备和书写对我来说是一个艰难的过程。幸运的是，软件与控制实验室从2007年开始就支持多旋翼飞行器的相关研究。那时，我还是一名学生（自2010年起，本人作为老师，留在实验室继续相关研究）。当时，张瑞峰和我全身心地投入到制作我们自己的四旋翼的工作中。这使我亲身经历了小型多旋翼飞行器的黄金发展时期。另外，开源自驾仪（如APM和PX4）的开发团队无私地分享了他们的设计文档，全世界的研究者们提供了大量的技术论文供我们参考。更重要的是，北京航空航天大学可靠飞行控制研究组（<http://rfly.buaa.edu.cn>）的同学们给予了热忱的支持和帮助。非常感谢任锦瑞、赵峙尧、杜光勋、戴训华、魏子博、邓恒、史东杰、蔡阳光、颜江、董洪信、傅嘉宁、郭正龙、张婧、骆遥、郑帅勇、张小威、马海彪、张贺鹏和杜百会为本书准备材料，审阅了每个章节，并且对相关内容进行仿真。我要感谢我的同事奚知宇副教授、研究生 Usman Arif、Hanna Tereshchenko 和本科生肖昆，他们校对了书稿并提出了很好的修改建议。我还想感谢北京航空航天大学的霍伟教授、李大伟高级工程师、大疆创新科技的于云，以及中航工业信息技术中心的朱亮博士，他们对书中内容提出了宝贵的意见和建议。本书曾在北京航空航天大学 and 中国人民解放军国防科学技术大学以讲义的形式使用，学生们提供了非常宝贵的反馈意见，在此一并感谢。最后，感谢郭祥为本书每章封面精心制作了插画。

全权

于北京

2016年12月

# 符号表

$=$	等于
$\approx$	约等于
$\sim$	同一数量级或概率分布
$\triangleq$	定义。 $x \triangleq y$ 意味着在某些假设条件下 $x$ 被重新定义为 $y$
$\equiv$	恒等于
$\in$	属于
$\perp$	垂直
$\times$	叉乘
$\otimes$	四元数乘法
$\mathbb{C}$	复数域
$\mathcal{D}$	$\mathcal{D} = \{\mathbf{D}   \mathbf{D} = (d_{i,j}), d_{i,j} = 0 \text{ if } i \neq j\}$ , 对角矩阵集合
$\mathcal{P}$	$\mathcal{P} = \{\mathbf{P}   \mathbf{P} > 0\}$ , 正定矩阵集合
$\mathbb{R}, \mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{n \times m}$	实数域, $n$ 维欧氏空间, $n \times m$ 维欧氏空间
$\mathbb{R}_+$	正实数集
$\mathcal{S}$	$\mathcal{S} = \{\mathbf{S}   \mathbf{S} = \mathbf{S}^T\}$ , 对称矩阵集合
$\mathbb{Z}$	整数
$\mathbb{Z}_+$	正整数
$\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$	单位向量, $\mathbf{e}_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$ , $\mathbf{e}_2 = [0 \ 1 \ 0]^T$ , $\mathbf{e}_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$
$\mathbf{I}_n$	$n \times n$ 维单位矩阵
$\mathbf{0}_{n \times m}$	$n \times m$ 维零矩阵
$x$	标量
$\mathbf{x}$	向量, $x_i$ 表示向量 $\mathbf{x}$ 的第 $i$ 个元素
$\dot{\mathbf{x}}, \frac{d\mathbf{x}}{dt}$	对时间 $t$ 的一阶导数
$\hat{\mathbf{x}}$	$\mathbf{x}$ 的估计值
$[\mathbf{x}]_{\mathbf{x}}$	$[\mathbf{x}]_{\mathbf{x}} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}_{\mathbf{x}}$ , $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$
${}^i\mathbf{x}$	向量 $\mathbf{x}$ 在坐标系 $i$ 中的表示。例如, ${}^e\mathbf{x}$ 和 ${}^b\mathbf{x}$ 分别表示向量 $\mathbf{x}$ 在坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 和坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 中的表示
$\mathbf{A}$	矩阵, $a_{ij}$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 在第 $i$ 行第 $j$ 列的元素
$\mathbf{A}^T$	$\mathbf{A}$ 的转置
$\mathbf{A}^{-T}$	$\mathbf{A}$ 的逆的转置



$\mathbf{A}^\dagger$	$\mathbf{A}$ 的广义逆
$\det(\mathbf{A})$	$\mathbf{A}$ 的行列式
$\text{tr}(\mathbf{A})$	方阵 $\mathbf{A}$ 的迹, $\text{tr}(\mathbf{A}) \triangleq \sum_{i=1}^n a_{ii}, \mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$
$\mathbf{q}$	四元数, $\mathbf{q}_b^e$ 表示从坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 到坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 的旋转
$\mathbf{q}^*$	共轭四元数
$\mathbf{q}^{-1}$	四元数的逆
$(\cdot)^{(k)}$	对时间 $t$ 的 $k$ 阶导数
$\nabla$	梯度
$\text{Cov}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$	协方差, $\text{Cov}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \triangleq \text{E} \left( (\mathbf{x} - \text{E}(\mathbf{x})) (\mathbf{y} - \text{E}(\mathbf{y}))^T \right)$ , $\text{Cov}(\mathbf{x}) \triangleq \text{E} \left( (\mathbf{x} - \text{E}(\mathbf{x})) (\mathbf{x} - \text{E}(\mathbf{x}))^T \right)$
$\mathcal{C}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$	系数矩阵对 $(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ 的可控性矩阵, $\mathcal{C}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]$
$\text{E}(\mathbf{x})$	随机变量 $\mathbf{x}$ 的期望
$L_{\mathbf{f}}h$	函数 $h$ 对向量域 $\mathbf{f}$ 的李导数
$L_{\mathbf{f}}^i h$	$L_{\mathbf{f}}h$ 的 $i$ 阶导数, $L_{\mathbf{f}}^i h = \nabla (L_{\mathbf{f}}^{i-1} h) \mathbf{f}$
$\mathcal{O}(\mathbf{A}, \mathbf{C}^T)$	系数矩阵对 $(\mathbf{A}, \mathbf{C})$ 的可观性矩阵, $\mathcal{O}(\mathbf{A}, \mathbf{C}^T) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C}^T \mathbf{A} \\ \vdots \\ \mathbf{C}^T \mathbf{A}^{n-1} \end{bmatrix}$
$\text{vex}(\cdot)$	$\text{vex}([\mathbf{x}]_x) \triangleq \mathbf{x}$
$\text{Var}(x)$	随机变量 $x$ 的方差, $\text{Var}(x) \triangleq \text{E} \left( (x - \text{E}(x))^2 \right)$
$ \cdot $	绝对值
$\ \cdot\ $	欧氏范数, $\ \mathbf{x}\  \triangleq \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$
$\ \cdot\ _\infty$	无穷范数, $\ \mathbf{x}\ _\infty = \max \{ x_1 , \dots,  x_n \}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$
$\mathbf{a}$	多旋翼的比力, $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^3$ 。比如, ${}^e \mathbf{a}$ 和 ${}^b \mathbf{a}$ 分别为向量 $\mathbf{a}$ 在坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 和坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 下的表示; $a_{x_i}, a_{y_i}, a_{z_i}$ 分别代表比力沿坐标轴 $o_i x_i, o_i y_i, o_i z_i$ 的分量, $i = e, b$ 。(m/s <sup>2</sup> )
${}^b \mathbf{a}_m$	由加速度计测得的比力, 即, ${}^b \mathbf{a}_m = [a_{x_{bm}} \ a_{y_{bm}} \ a_{z_{bm}}]^T$ (m/s <sup>2</sup> )
$b_{d_{\text{baro}}}$	气压计测量高度时的漂移量 (m)
$\mathbf{B}_f$	多旋翼带有效率系数的控制效率矩阵
$C_M$	力矩系数 (N·m·s <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )
$C_T$	拉力系数 (N·s <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )
$C_R$	常量参数, 表示从油门到电机转速的线性关系的斜率
$d_{\text{baro}}$	气压计的高度测量值 (m)
$d_{\text{sonar}}$	超声波测距仪的距离测量值 (m)
$f$	多旋翼受到的总拉力 (N)



$\mathbf{f}$	作用于多旋翼的拉力向量, $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^3$ 。比如, ${}^e\mathbf{f}$ 和 ${}^b\mathbf{f}$ 分别表示向量 $\mathbf{f}$ 在坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 和坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 下的表示; $f_{x_i}, f_{y_i}, f_{z_i}$ 分别表示沿坐标轴 $o_i x_i, o_i y_i, o_i z_i$ 的拉力分量, $i = e, b$ 。或者表示螺旋桨推力向量 (N)
$g$	重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )
$\mathbf{J}$	多旋翼的转动惯量, $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$ 是中心主转动惯量, $J_{xy}, J_{yz}, J_{xz}$ 是惯性积 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )
$k_{\text{drag}}$	阻力系数, $k_{\text{drag}} \in \mathbb{R}_+$ , 可以用来确定作用在旋转桨叶上的阻力
$m$	多旋翼的质量 (kg)
$M$	螺旋桨扭矩 (N·m), 或代表一个正整数
$M_i$	第 $i$ 个螺旋桨产生的反扭矩 (N·m)
${}^b\mathbf{m}_m$	磁力计在 $o_b x_b y_b z_b$ 坐标系下的测量值, 即 ${}^b\mathbf{m}_m = [m_{x_b} \quad m_{y_b} \quad m_{z_b}]^T$
${}^e\mathbf{m}$	磁感应强度在 $o_e x_e y_e z_e$ 坐标系下的表示
$\mathbf{M}_{n_r}$	控制效率矩阵, $\mathbf{M}_{n_r} \in \mathbb{R}^{4 \times n_r}$
$n_r$	动力单元个数
$N$	电机转速 (RPM), 或一个正整数
$o_b x_b y_b z_b$	机体坐标系
$o_e x_e y_e z_e$	地球固连坐标系
$\mathbf{p}$	多旋翼中心的位置, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ 。比如, ${}^e\mathbf{p}$ 和 ${}^b\mathbf{p}$ 分别为向量 $\mathbf{p}$ 在坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 和坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 下的表示。 $p_{x_i}, p_{y_i}, p_{z_i}$ 分别表示沿坐标轴 $o_i x_i, o_i y_i, o_i z_i$ 的位置分量, $i = e, b$ 。 (m)
$\mathbf{p}_{\text{GPS}}$	GPS 接收机测量得到的位置, $\mathbf{p}_{\text{GPS}} \in \mathbb{R}^3$ 。比如, $(p_{x_{\text{GPS}}}, p_{y_{\text{GPS}}})$ 表示 GPS 接收机测量的二维位置 (m)
$\mathbf{p}_h$	水平位置, $\mathbf{p}_h = [p_{x_e} \quad p_{y_e}]^T$ (m)
$\hat{\mathbf{R}}$	旋转矩阵的估计
$\tilde{\mathbf{R}}$	$\mathbf{R}_m$ 与 $\hat{\mathbf{R}}$ 之间的误差, 即 $\tilde{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{R}}^T \mathbf{R}_m$
$\mathbf{R}_a^b$	$\mathbf{R}_a^b \in SO(3) \triangleq \{\mathbf{A}   \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{I}_3, \det(\mathbf{A}) = 1, \mathbf{A} \in \mathbb{R}^3\}$ 表示将向量从坐标系 $a$ 旋转到坐标系 $b$ 的旋转矩阵
$\mathbf{R}_m$	由加速度计和磁力计观测得到的旋转矩阵
$T_m$	时间常数, 可以决定电机的动态响应
$\mathbf{v}$	多旋翼中心的速度, $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ 。比如, ${}^e\mathbf{v}$ 和 ${}^b\mathbf{v}$ 分别表示向量 $\mathbf{v}$ 在坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 和坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 下的表示; $v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i}$ 分别表示沿坐标轴 $o_i x_i, o_i y_i, o_i z_i$ 的速度分量, $i = e, b$ 。 (m/s)
$\dot{v}_{x_i}, \dot{v}_{y_i}, \dot{v}_{z_i}$	分别为多旋翼沿坐标轴 $o_i x_i, o_i y_i, o_i z_i$ 的加速度分量, $i = e, b$ 。 ( $\text{m/s}^2$ )
$\mathbf{W}$	表示姿态角速率与机体角速度之间关系的矩阵
$\theta_m$	俯仰角测量值 (rad)
$\Theta$	欧拉角, $\Theta = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T$ , 其中 $\theta, \phi, \psi$ 分别为俯仰角, 滚转角和偏航角
$\boldsymbol{\tau}$	力矩 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$ , 其中 $\tau_x, \tau_y, \tau_z$ 分别表示沿坐标轴 $o_b x_b, o_b y_b, o_b z_b$ 的力矩分量 (N·m)
$\sigma$	油门指令



$\psi_{\text{GPS}}$	根据 GPS 信息得到的偏航角估计值 (rad)
$\psi_{\text{m}}$	偏航角测量值 (rad)
$\psi_{\text{mag}}$	根据磁力计信息得到的偏航角估计值 (rad)
$\boldsymbol{\omega}$	多旋翼的角速度, $\boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^3$ 。比如, ${}^e\boldsymbol{\omega}$ 和 ${}^b\boldsymbol{\omega}$ 分别表示向量 $\boldsymbol{\omega}$ 在坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 和坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 下的表示, $\omega_{x_i}, \omega_{y_i}, \omega_{z_i}$ 分别表示沿着坐标轴 $o_i x_i, o_i y_i, o_i z_i$ 的角速度分量, $i = e, b$ 。(rad/s)
${}^b\boldsymbol{\omega}_{\text{m}}$	标定后的角速度 (rad/s)
$\boldsymbol{\omega}$	螺旋桨的角速度 (rad/s)
$\boldsymbol{\omega}_{\text{b}}$	常参数, 为从油门到电机转速线性关系中的常数项
$\boldsymbol{\omega}_k$	第 $k$ 个螺旋桨的角速度, $\boldsymbol{\omega}_k \in \mathbb{R}_+$ (rad/s)
$\boldsymbol{\omega}_{\text{ss}}$	电机的稳态转速 (rad/s)



# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念	2
1.1.1 常见飞行器分类	2
1.1.2 无人驾驶飞机和航空模型飞机	4
1.2 多旋翼遥控和性能评估	5
1.2.1 遥控	5
1.2.2 性能评估	9
1.2.3 瓶颈	11
1.3 多旋翼发展历史	11
1.3.1 休眠期	12
1.3.2 复苏期	13
1.3.3 发展期	14
1.3.4 活跃期	15
1.3.5 爆发期	16
1.3.6 评注	19
1.4 本书的目的和写作结构	19
1.4.1 本书的目的	19
1.4.2 写作结构	20
习题 1	23
参考文献	23

## 第一篇 设计篇

第 2 章 基本组成	28
2.1 总体介绍	29
2.2 机架	31
2.2.1 机身	31
2.2.2 起落架	32
2.2.3 涵道	32
2.3 动力系统	33
2.3.1 螺旋桨	33



2.3.2	电机	36
2.3.3	电调	39
2.3.4	电池	40
2.4	指挥控制系统	42
2.4.1	遥控器和接收机	42
2.4.2	自驾仪	44
2.4.3	地面站	47
2.4.4	数传电台	47
	本章小结	48
	练习 2	49
	参考文献	49
<b>第 3 章</b>	<b>机架设计</b>	<b>50</b>
3.1	布局设计	51
3.1.1	机架布局	51
3.1.2	气动布局	58
3.2	结构设计	59
3.2.1	机架结构设计原则	59
3.2.2	减振考虑	59
3.2.3	减噪考虑	61
	本章小结	62
	习题 3	63
	参考文献	63
<b>第 4 章</b>	<b>动力系统建模和估算</b>	<b>64</b>
4.1	问题描述	65
4.2	动力系统建模	66
4.2.1	螺旋桨建模	66
4.2.2	电机建模	68
4.2.3	电调建模	69
4.2.4	电池建模	70
4.3	性能估算	70
4.3.1	求解问题 1	70
4.3.2	求解问题 2	71
4.3.3	求解问题 3	73
4.3.4	求解问题 4	74



4.4 实验测试 .....	76
4.5 附录 .....	77
4.5.1 求解螺旋桨拉力系数与转矩系数的详细步骤 .....	77
4.5.2 求解电机等效电压和电流的详细步骤 .....	79
本章小结 .....	82
习题 4 .....	82
参考文献 .....	83

## 第二篇 建模篇

<b>第 5 章 坐标系和姿态表示</b> .....	<b>88</b>
5.1 坐标系 .....	89
5.2 姿态表示 .....	89
5.2.1 欧拉角 .....	90
5.2.2 旋转矩阵 .....	93
5.2.3 四元数 .....	95
本章小结 .....	105
习题 5 .....	105
参考文献 .....	105
<b>第 6 章 动态模型和参数测量</b> .....	<b>107</b>
6.1 多旋翼控制模型 .....	108
6.1.1 总体描述 .....	108
6.1.2 多旋翼飞行控制刚体模型 .....	109
6.1.3 控制效率模型 .....	112
6.1.4 动力单元模型 .....	114
6.2 多旋翼气动阻力模型 .....	115
6.2.1 桨叶挥舞 .....	115
6.2.2 多旋翼气动阻力模型 .....	116
6.3 多旋翼模型参数测量 .....	117
6.3.1 重心位置 .....	117
6.3.2 重量 .....	118
6.3.3 转动惯量 .....	118
6.3.4 动力单元参数测量 .....	121
本章小结 .....	125
习题 6 .....	125
参考文献 .....	125



### 第三篇 感知篇

<b>第7章 传感器标定和测量模型</b> .....	128
7.1 三轴加速度计 .....	129
7.1.1 基本原理 .....	129
7.1.2 标定 .....	130
7.1.3 测量模型 .....	131
7.2 三轴陀螺仪 .....	132
7.2.1 基本原理 .....	132
7.2.2 标定 .....	132
7.2.3 测量模型 .....	135
7.3 三轴磁力计 .....	135
7.3.1 基本原理 .....	135
7.3.2 标定 .....	135
7.4 超声波测距仪 .....	138
7.5 气压计 .....	138
7.6 二维激光测距仪 .....	139
7.7 全球定位系统 .....	141
7.7.1 基本原理 .....	141
7.7.2 标定 .....	143
7.7.3 测量模型 .....	143
7.7.4 补充: 经纬度距离和航向计算 .....	143
7.8 摄像机 .....	144
7.8.1 基本原理 .....	144
7.8.2 测量模型 .....	145
7.8.3 标定 .....	147
7.8.4 工具箱 .....	149
本章小结 .....	150
习题7 .....	150
参考文献 .....	150
<b>第8章 可观性和卡尔曼滤波器</b> .....	152
8.1 可观性 .....	153
8.1.1 线性系统 .....	153
8.1.2 连续时间非线性系统 .....	157
8.2 卡尔曼滤波器 .....	161



8.2.1	目标	161
8.2.2	预备知识	162
8.2.3	理论推导	162
8.2.4	多速率卡尔曼滤波器	169
8.3	扩展卡尔曼滤波器	169
8.3.1	基本原理	170
8.3.2	理论推导	170
8.3.3	隐式扩展卡尔曼滤波器	172
	本章小结	173
	习题 8	173
	参考文献	173
<b>第 9 章</b>	<b>状态估计</b>	<b>175</b>
9.1	姿态估计	176
9.1.1	测量原理	176
9.1.2	线性互补滤波器	179
9.1.3	非线性互补滤波器	182
9.1.4	卡尔曼滤波器	183
9.2	位置估计	184
9.2.1	基于 GPS 的位置估计	184
9.2.2	基于 SLAM 的位置估计	185
9.3	速度估计	189
9.3.1	基于光流的速度估计方法	189
9.3.2	基于气动阻力模型的速度估计方法	192
9.4	障碍估计	194
9.4.1	延伸焦点计算	194
9.4.2	碰撞时间计算	195
	本章小结	197
	习题 9	197
	参考文献	198

## 第四篇 控制篇

<b>第 10 章</b>	<b>稳定性和可控性</b>	<b>202</b>
10.1	稳定性定义	203
10.2	稳定性判据	205
10.2.1	多旋翼的稳定性	205

10.2.2	稳定性的一些结果	205
10.3	可控性基本概念	210
10.3.1	经典可控性	210
10.3.2	正可控性	210
10.4	多旋翼的可控性	212
10.4.1	多旋翼模型建立	212
10.4.2	经典可控性	213
10.4.3	正可控性分析	214
10.4.4	多旋翼系统可控性	216
10.4.5	进一步说明	220
10.5	附录: 引理 10.1 的证明	220
	本章小结	221
	习题 10	222
	参考文献	223
<b>第 11 章</b>	<b>底层飞行控制</b>	<b>225</b>
11.1	多旋翼底层飞行控制框架	226
11.2	简化的线性模型	227
11.3	位置控制	229
11.3.1	基本概念	229
11.3.2	欧拉角作为输出	230
11.3.3	旋转矩阵作为输出	234
11.4	姿态控制	237
11.4.1	基本概念	237
11.4.2	基于欧拉角的姿态控制	237
11.4.3	基于旋转矩阵的姿态控制	238
11.4.4	鲁棒姿态控制	239
11.5	控制分配	245
11.5.1	基本概念	245
11.5.2	控制分配在自驾仪中的实现	245
11.6	电机控制	247
11.6.1	闭环控制	247
11.6.2	开环控制	247
11.7	综合仿真	248
11.7.1	控制目标和系统参数设置	248



11.7.2	基于欧拉角的姿态控制结合基于欧拉角的位置控制	248
11.7.3	基于旋转矩阵的姿态控制结合基于旋转矩阵的位置控制	251
11.7.4	鲁棒姿态控制	253
	本章小结	253
	习题 11	254
	参考文献	255
<b>第 12 章</b>	<b>基于半自主自驾仪的位置控制</b>	<b>257</b>
12.1	问题描述	258
12.1.1	带有半自主自驾仪的多旋翼控制结构	258
12.1.2	三通道模型	259
12.1.3	位置控制的目标	260
12.2	系统辨识	260
12.2.1	系统辨识步骤和工具	260
12.2.2	系统辨识中用到的模型	262
12.3	位置控制器的设计	265
12.3.1	PID 控制器	265
12.3.2	基于加性输出分解的动态逆控制器	265
12.4	仿真	266
12.4.1	系统辨识	268
12.4.2	控制	271
12.4.3	跟踪性能对比	272
	本章小结	274
	习题 12	275
	参考文献	275

## 第五篇 决策篇

<b>第 13 章</b>	<b>任务决策</b>	<b>280</b>
13.1	全自主控制	281
13.1.1	总体介绍	281
13.1.2	任务规划	282
13.1.3	路径规划	284
13.2	半自主控制	293
13.2.1	半自主控制的三种模式	294
13.2.2	遥控	295